

# Потоковый анализ

(Data-flow analysis)

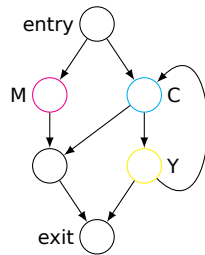
## Потоковый анализ (Data flow analysis)

- Статический
- Глобальный (весь CFG)
- Зависит от потока управления
- Вычисление свойств исполнения программы
- Единая формальная модель и теория

## Примеры

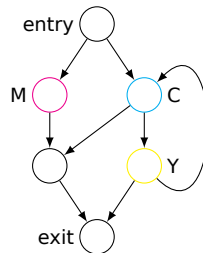
- Reaching definitions (use-def links)
- Liveness analysis
- Constant propagation
- Constant subexpression elimination
- Dead code elimination

CFG



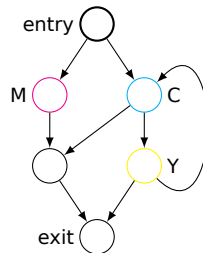
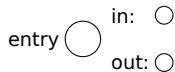
## Окружение потокового анализа

- Поточный граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



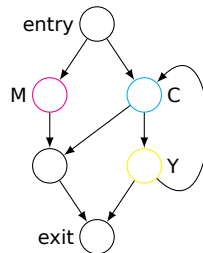
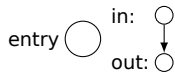
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



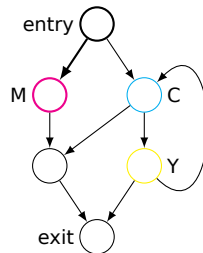
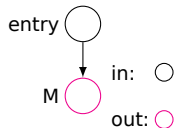
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



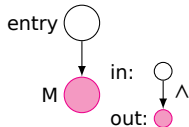
## Окружение потокового анализа

- Поточный граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



## Окружение потокового анализа

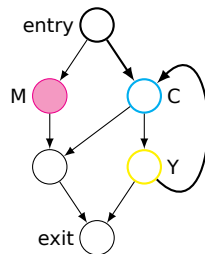
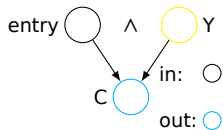
- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$





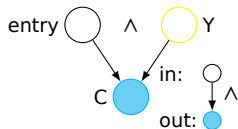
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



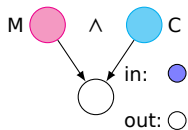
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



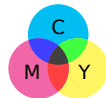
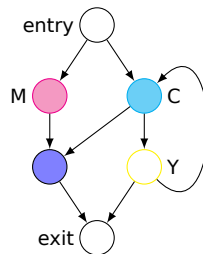
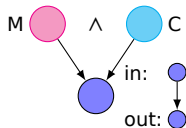
## Окружение потокового анализа

- Поточный граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



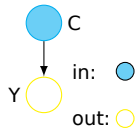
## Окружение потокового анализа

- Поточный граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



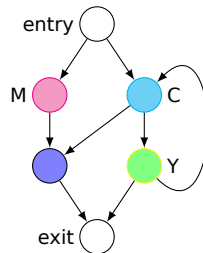
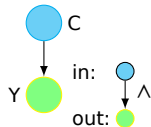
## Окружение потокового анализа

- Поточный граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



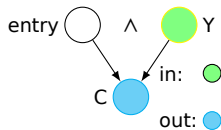
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



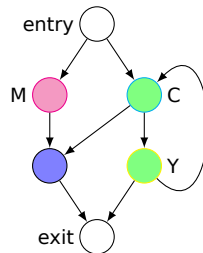
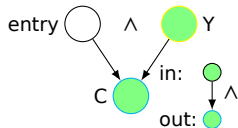
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



## Окружение потокового анализа

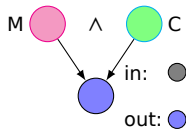
- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$





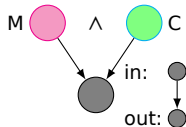
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



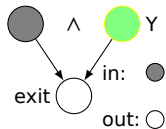
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



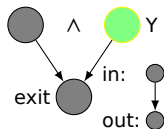
## Окружение потокового анализа

- Поточковый граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



## Окружение потокового анализа

- Поточный граф  $G = \langle V, E, v_{entry}, v_{exit} \rangle$
- Направление анализа  $D = \{\downarrow, \uparrow\}$
- Полурешетка свойств  $\langle L, \wedge \rangle$
- Преобразователи свойств  $PT_{v \in V} : L \rightarrow L$
- Начальное значение  $in(v_{entry})$  или  $out(v_{exit})$



## Бинарная операция $\wedge$ (*meet*)

- $x \wedge x = x$  (идемпотентность)
- $x \wedge y = y \wedge x$  (коммутативность)
- $(x \wedge y) \wedge z = x \wedge (y \wedge z)$  (ассоциативность)

## Частичный порядок $\leq$

- $x \leq x$  (рефлексивность)
- $x \leq y \ \& \ y \leq z \Rightarrow x \leq z$  (транзитивность)
- $x \leq y \ \& \ y \leq x \Rightarrow x = y$  (антисимметричность)

## Полурешетка $\langle L, \wedge \rangle$ <sup>1 2</sup>

- $x \leq y \Leftrightarrow_{def} x \wedge y = x$
- $x < y \Leftrightarrow_{def} x \wedge y = x \ \& \ x \neq y$

---

<sup>1</sup>Выполняются ли свойства частичного порядка при таком определении  $\leq$  через  $\wedge$ ?

<sup>2</sup>Можно ли восстановить полурешетку  $\langle L, \wedge \rangle$  имея только частичный порядок  $\langle L, \leq \rangle$ ?

## Бинарная операция $\wedge$ (meet)

- $x \wedge x = x$  (идемпотентность)
- $x \wedge y = y \wedge x$  (коммутативность)
- $(x \wedge y) \wedge z = x \wedge (y \wedge z)$  (ассоциативность)

## Частичный порядок $\leq$

- $x \leq x$  (рефлексивность)
- $x \leq y \ \& \ y \leq z \Rightarrow x \leq z$  (транзитивность)
- $x \leq y \ \& \ y \leq x \Rightarrow x = y$  (антисимметричность)

## Полурешетка $\langle L, \wedge \rangle$ <sup>1 2</sup>

- $x \leq y \Leftrightarrow_{def} x \wedge y = x$
- $x < y \Leftrightarrow_{def} x \wedge y = x \ \& \ x \neq y$

## Свойства полурешеток

- Ограниченность снизу  
 $\exists \perp \in L : \forall x \in L : \perp \wedge x = \perp \ (\perp \leq x)$
- Ограниченность сверху  
 $\exists \top \in L : \forall x \in L : \top \wedge x = x \ (x \leq \top)$
- Высота полурешетки  
 $H_L = \max \{ |x_1 > x_2 > \dots \in L| \}$
- Обрыв убывающих цепей  
 $\forall x_1 > x_2 > \dots \in L : \exists k : \nexists y \in L : x_k > y$
- Произведение полурешеток  
 $\langle A, \wedge_A \rangle \times \langle B, \wedge_B \rangle = \langle A \times B, \wedge \rangle,$   
 $(a, b) \wedge (a', b') = (a \wedge_A a', b \wedge_B b')$

<sup>1</sup>Выполняются ли свойства частичного порядка при таком определении  $\leq$  через  $\wedge$ ?

<sup>2</sup>Можно ли восстановить полурешетку  $\langle L, \wedge \rangle$  имея только частичный порядок  $\langle L, \leq \rangle$ ?

- Множество подмножеств  $S$   
 $L = 2^S, \wedge = \cap$  (или  $\cup$ )
- Натуральные числа  
 $L = \mathbb{N}, x \wedge y = \min(x, y)$
- Константные целочисленные значения  
 $L = \mathbb{Z} \cup \{T, \perp\}, \perp < \mathbb{Z} < T$
- Иерархия типов в программе  
 $L = Types, x \leq y = x <: y$  (*subtype*)

Монотонность

Монотонность на полурешетке

Дистрибутивность



- Поточный граф
- Полурешетка свойств
- Начальная разметка
- Преобразователи свойств
  - Семейство монотонных функций

- MOP
- MFP
  - $\exists MFP$
  - $\exists! MFP$
  - $MFP \leq MOP$
- Теорема Килдалла
  - дистрибутивность преобразователей  $\Rightarrow MFP = MOP$
- Неразрешимость

Topsort ??

Спасибо за внимание